

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВЫХОДНОМ УЧАСТКЕ ТВС РЕАКТОРА ТИПА РИТМ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В, Доронкова Д.С.,
Добров А.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н.Новгород, Россия)

Введение

В настоящее время ведется разработка проекта инновационной атомной станции малой мощности на базе модернизированных судовых реакторных установок типа РИТМ, в которых современные технологии судовой ядерной энергетики получили свое дальнейшее развитие [1-2].

Активная зона модернизированного реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности [3-4] имеет ряд важных конструктивных отличий от своего судового прототипа, к которым относятся модернизация геометрии головок тепловыделяющих сборок (ТВС) и увеличение числа областей контроля температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны.

Модернизация конструкции головки ТВС заключалась в изменении количества и формы профиля сливных окон для радиального выхода потока теплоносителя. Новая конструкция головки имеет одинаковое число сливных окон и отверстий, равное шести.

Контроль температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны осуществляется с помощью термометров сопротивления (ТСР), заключенных в специально спроектированные трубы отбора теплоносителя. Трубы отбора теплоносителя к ТСР расположены напротив сливных окон и отверстий модернизированной головки ТВС. На показания ТСР может влиять неравномерность структуры осевого течения потока на выходе из твэльного пучка и модернизированной головки ТВС, а также возможное образование локальных горячих или холодных струй теплоносителя, которые в свою очередь могут исказить показания термометра сопротивления. Это в свою очередь снизит точность определения температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны, а точность и надежность контроля температуры теплоносителя особенно важны в переходных режимах работы энергетической установки [5].

Таким образом, экспериментальное изучение гидродинамических процессов перемешивания теплоносителя в выходном участке ТВС с головкой новой конструкции и определение областей поперечного сечения твэльного пучка, из которых происходит попадание потока теплоносителя в трубу отбора к ТСР является актуальной научной задачей. Решение данной научной задачи поможет при обосновании конструкторских решений по модернизации активных зон кассетного типа для атомных станций малой мощности наземного исполнения.

1. Исследовательский стенд

Моделирование гидродинамической картины течения теплоносителя в выходном участке ТВС кассетного типа проводилось на исследовательском аэродинамическом стенде [6-7] в НГТУ им Р.Е. Алексеева. Исследовательская установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой (рис. 1). Течение водяного теплоносителя в выходном участке ТВС моделируется воздушным потоком основываясь на теории гидродинамического подобия [8].



Рис. 1. Исследовательский стенд

Рабочие параметры научно-исследовательской установки: рабочая среда – воздух, производительность вентилятора – $18\,540\text{ м}^3/\text{час}$, полное давление в ресиверной емкости – 6 КПа.

Исследования проводились на специально созданной экспериментальной модели (ЭМ) (рис. 2), выполненной в виде шестигранного канала, геометрически повторяющего натурный выходной участок ТВС, в котором размещены:

- а) пучок стержней двух типов, диаметром 40 мм и 36 мм, имитирующих соответственно ТВЭЛы и стержни выгорающего поглотителя;
- б) макеты двух дистанционирующих решеток;
- в) имитатор центрального вытеснителя цилиндрической формы диаметром 180 мм и имитатор его наконечника с отверстиями для протечки теплоносителя;
- г) макет модернизированной головки ТВС, состоящий двух частей (нижней с шестью сливными отверстиями и шестью сливными окнами и верхней без отверстий);
- д) макет фрагмента верхней опорной плиты с сегментами пяти сливных отверстий и имитатором трубы отбора теплоносителя.



Рис. 2. ЭМ выходного участка ТВС

Все элементы ЭМ увеличены на коэффициент геометрического подобия равный 5,79 относительно натурного изделия.

Измерение величины осевой скорости потока в модели проводилось с помощью пневмометрического метода с использованием цифрового дифференциального

манометра ДМЦ-01М с прямыми и Г-образными трубками Пито. Предел допускаемой основной погрешности измерений цифрового дифференциального манометра ДМЦ-01М не превышает 5%.

Изучение перемешивания теплоносителя за модернизированной головкой ТВС и выявление областей поперечного сечения пучка твэлов, из которых горячие или холодные струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора осуществлялись методом впрыска контрастной примеси (газ пропан). Этот метод заключается в том, что по направлению и силе поперечного растекания примеси можно оценить интенсивность перемешивания теплоносителя. Подача контрастной примеси производилась перед выходной дистанционирующей решеткой по ходу движения потока. Отслеживание примеси в объеме модели осуществлялось прямыми и Г-образными трубками Пито, подключенными к газоанализатору АДК-03Р. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 15 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует 1 объемному проценту газа примеси в газозооной смеси.

2. Методика исследований

Исследование растекания контрастной примеси и осевой скорости потока осуществлялось в группе поперечных сечений, расположенных по длине ЭМ согласно схеме, приведенной на рисунке 3.

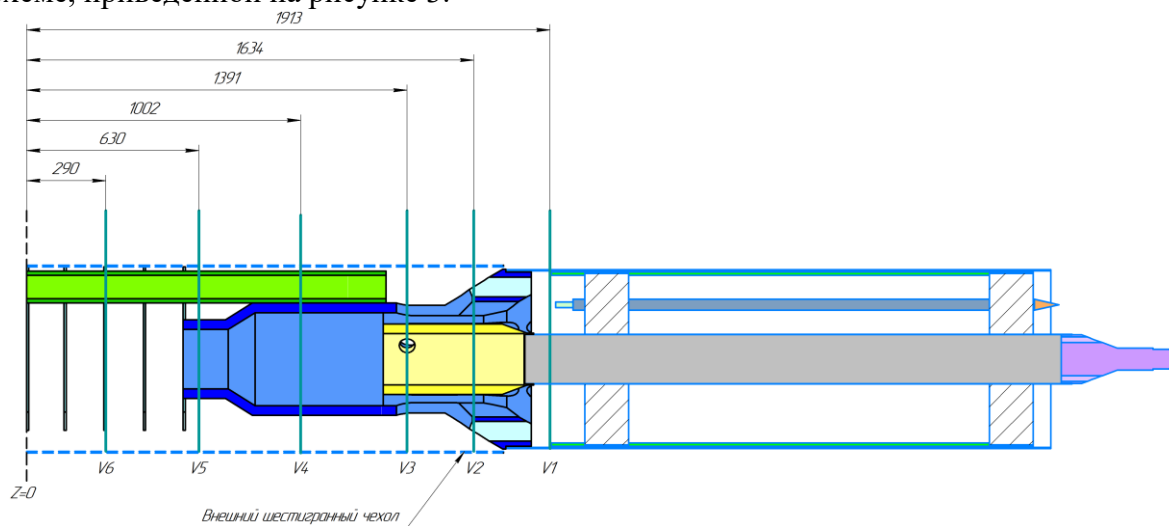


Рис. 3. Схема расположения сечений измерений

Расположение точек измерения величины осевой скорости потока и контрастной примеси в поперечных сечениях ЭМ приведено на рисунке 4.

Для выявления областей поперечного сечения твэльного пучка, из которых горячие или холодные струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора, в пучке твэлов имитаторов были выделены следующие характерные ячейки впрыска контрастной примеси:

- регулярные ячейки, расположенные как напротив трубы отбора теплоносителя, так и удаленные от нее;
- ячейки, расположенные возле трубы центрального вытеснителя и на периферии пучка имитаторов твэлов, возле уголков жесткости.

Выбранные ячейки впрыска контрастной примеси позволяют определить все основные области твэльного пучка, из которых образовавшиеся холодные или горячие струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора.

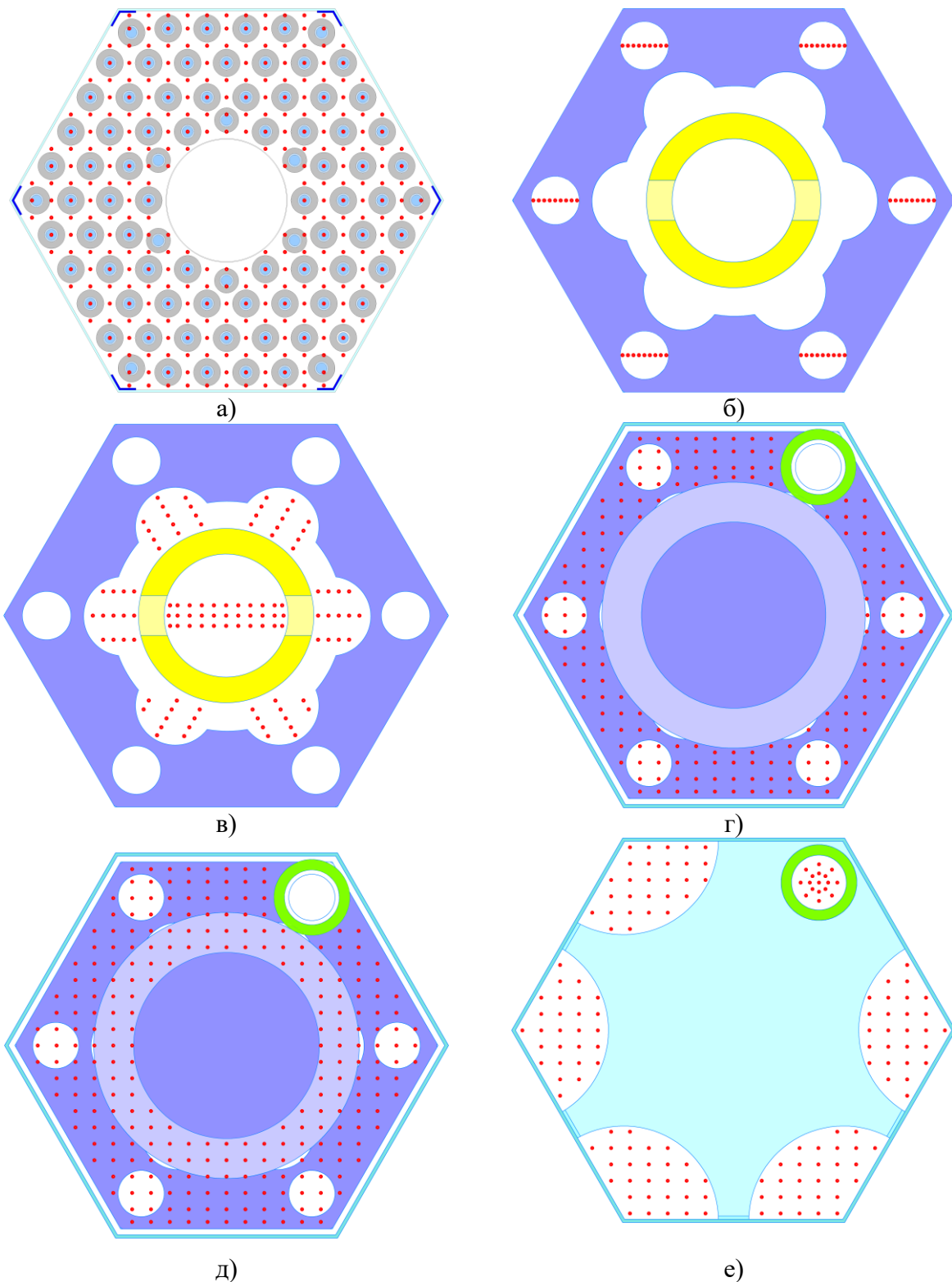


Рис. 4. Точки измерения величины осевой скорости потока
и концентрации контрастной примеси:

- а) выход из твэльного пучка; б) сливные отверстия головки; в) сливные окна головки и втулка
центрального вытеснителя; г, д) область между головкой и верхней опорной плитой;
е) сливные окна верхней опорной плиты и труба отбора теплоносителя

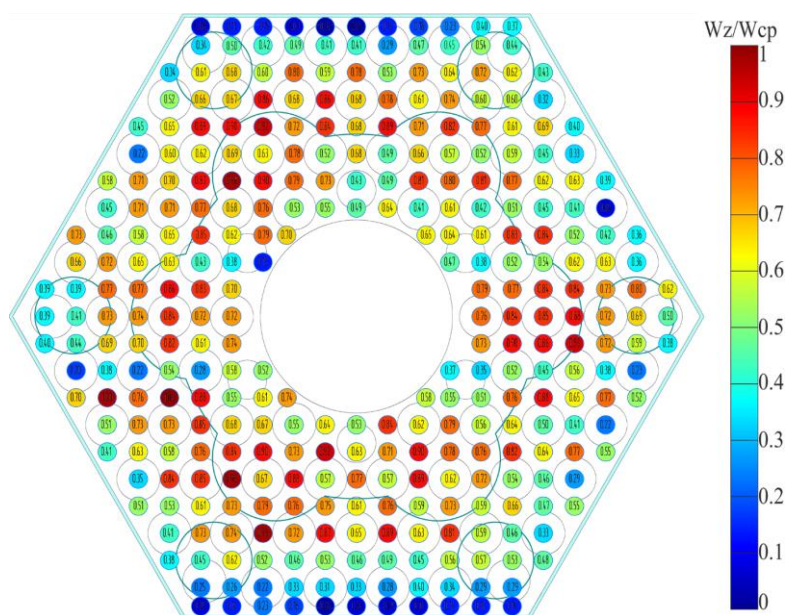


Рис. 5. Осовая скорость потока на выходе из пучка твэлов ($Re = 79000$)

Анализ гидродинамической картины течения теплоносителя в выходном участке ТВС осуществлялся с помощью картограмм распределения безразмерной осевой скорости и расхода потока теплоносителя, а также картограмм растекания примеси в поперечном сечении ЭМ.

Значения безразмерной осевой скорости потока рабочей среды получены путем нормирования локального значения осевой скорости в точке проведения измерения на величину среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в ЭМ.

Измерения проводились в зоне автомодельного течения воздушной рабочей среды исследовательского стенда, характеризующейся идентичностью безразмерных профилей скорости как для воздушной, так и для водяной среды. Следовательно, полученные опытные данные могут быть использованы при анализе картины течения теплоносителя в штатной топливной кассете. Измерения проводились при среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в модель 32,6 м/с и числе Рейнольдса 79000.

3. Результаты экспериментальных исследований

Анализ результатов исследования распределения аксиальной скорости и расхода потока теплоносителя в выходной части ТВС с использованием пневмометрического метода позволил сделать следующие выводы:

1. На выходе из пучка твэлов наблюдается значительная неравномерность поля аксиальной скорости потока, обусловленная влиянием геометрии модернизированной головки (рис. 5). Минимальные величины безразмерной аксиальной скорости потока расположены на периферии ТВС и лежат в диапазоне $(0,1 \div 0,4)$. Данный процесс обусловлен замедлением потока теплоносителя у стенок чехла ТВС и входной части головки. В областях у центрального вытеснителя и перед торцевой частью головки безразмерные аксиальные скорости потока лежат в диапазоне $(0,4 \div 0,8)$. Такая картина течения потока объясняется его торможением перед торцевой частью головки и о поверхность трубы центрального вытеснителя. Локальные максимумы безразмерных аксиальных скоростей потока, лежащих в диапазоне $(0,7 \div 0,9)$, располагаются напротив шести сливных окон и шести сливных отверстий головки.

2. На выходе из шести сливных отверстий головки наблюдается однородное

течение потока, характеризующееся равномерным профилем аксиальной скорости (рис. 6). Величина безразмерной аксиальной скорости потока лежит в диапазоне $(1,4 \div 1,5)$. В шести сливных окнах головки безразмерные аксиальные скорости потока лежат в диапазоне $(1,4 \div 1,6)$. В областях сливных окон, прилежащих к поверхности трубы центрального вытеснителя, величина безразмерной аксиальной скорости потока составляет 1,4, а в областях, расположенных напротив сливных отверстий, безразмерная аксиальная скорость составляет 1,6. Данное распределение аксиальных скоростей потока в сливных окнах головки ТВС говорит о замедлении потока у поверхности трубы центрального вытеснителя. Самые низкие аксиальные скорости потока на выходе из головки, лежащие в диапазоне $(0,1 \div 0,4)$, наблюдаются внутри трубы центрального вытеснителя.

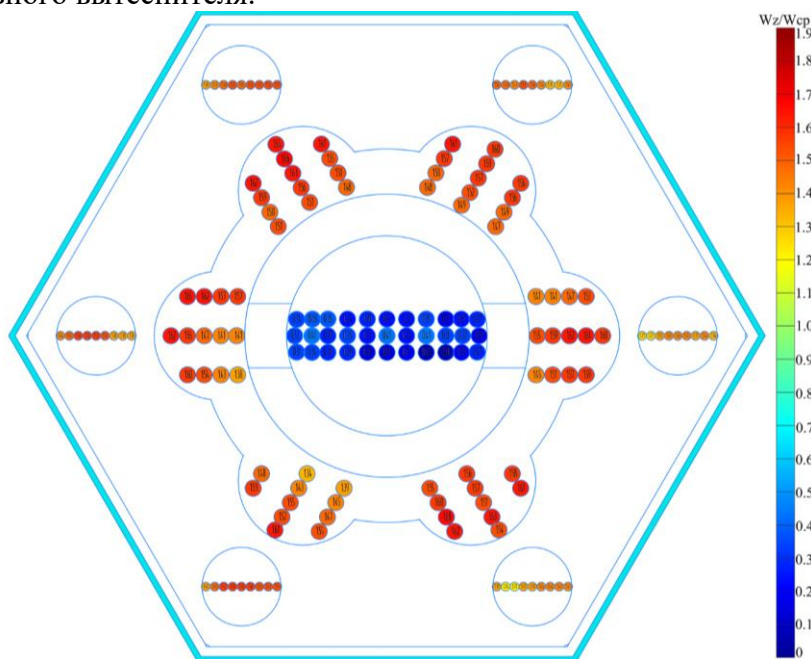


Рис. 6. Осевая скорость потока на выходе из модернизированной головки ТВС
($Re = 79000$)

3. В области между головкой ТВС и верхней опорной плитой выявлены следующие особенности течения потока:

- за шестью сливными отверстиями в широкой части головки ТВС наблюдаются зоны с низкими значениями аксиальных скоростей потока $(0,5 \div 0,6)$, а в областях поперечного сечения, лежащих между шестью сливными отверстиями, наблюдается образование локальных максимумов аксиальной скорости потока, значения которой составляют $(0,8 \div 1,2)$ (рис.7.а). Выявленная картина распределения аксиальной скорости свидетельствует о наличии в данной области поперечных течений теплоносителя, обусловленных преимущественно радиальным вытеканием потока теплоносителя из шести сливных окон головки.

- в узкой части головки ТВС, удаленной от выходных сечений сливных окон и отверстий, наблюдается обратная картина течения потока: в областях поперечного сечения, лежащих за шестью сливными отверстиями головки, наблюдаются зоны с относительно высокими безразмерными аксиальными скоростями, лежащими в диапазоне $(0,7 \div 0,9)$. В зонах, расположенных между сливными отверстиями, осевые аксиальные меньше и составляют $(0,5 \div 0,6)$ (рис.7.б). Такая картина течения теплоносителя обусловлена отсутствием влияния на структуру потока радиальных течений из шести сливных окон головки.

- в узкой части головки ТВС, удаленной от выходных сечений сливных окон и отверстий, наблюдается образование зоны низкой аксиальной скорости потока, величины которой лежат в диапазоне $(0,1 \div 0,4)$, что обусловлено торможением осевого потока у поверхностей головки и трубы отбора теплоносителя (рис.7.б).

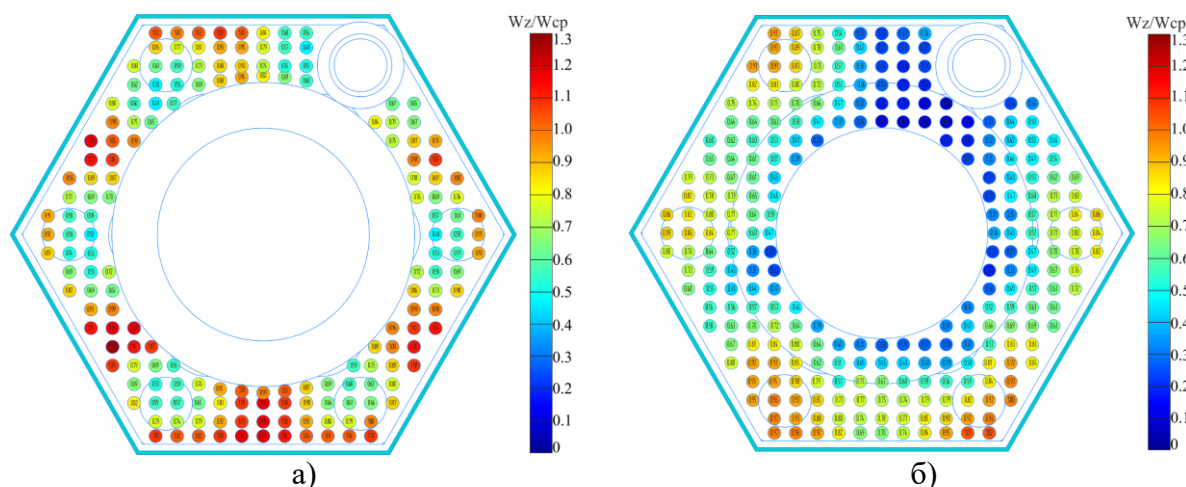


Рис. 7. Осевая скорость потока в области между головкой ТВС и верхней опорной плитой: а) широкий участок верхней части модернизированной головки; б) узкий участок верхней части модернизированной головки ($Re = 79000$)

4. В сегментах пяти сливных отверстий верхней опорной плиты наблюдается неравномерность поля аксиальной скорости потока, величины аксиальной скорости лежат в диапазоне $(0,4 \div 1,4)$ (рис. 8). В двух сливных отверстиях, расположенных возле трубы отбора теплоносителя, наблюдаются зоны с низкими величинами аксиальных скоростей потока, лежащих в диапазоне $(0,4 \div 0,8)$. Такое распределение аксиальной скорости потока обусловлено влиянием трубы отбора теплоносителя, которая вытесняет часть аксиального потока в соседние области, а также процессом торможения потока у поверхности трубы отбора теплоносителя. В трех сливных отверстиях, удаленных от трубы отбора теплоносителя поле аксиальной скорости потока однородно, а величины скорости лежат в диапазоне $(1,1 \div 1,4)$. В самой трубе отбора теплоносителя поле аксиальной скорости потока однородно, а величины скорости лежат в диапазоне $(0,5 \div 0,75)$.

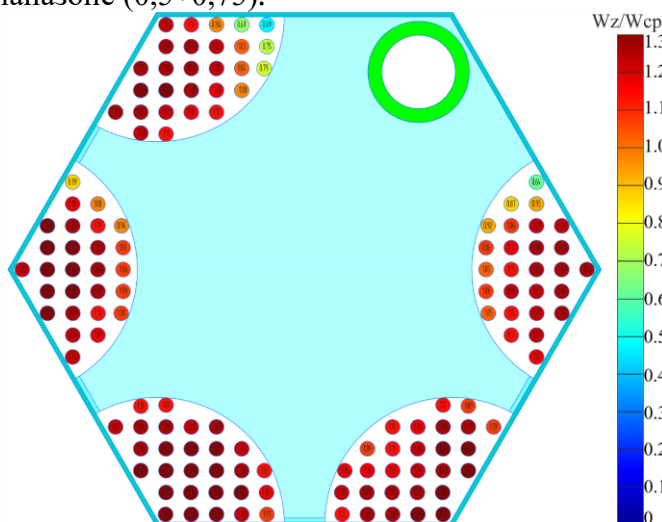


Рис. 8. Осевая скорость потока в сегментах сливных отверстий верхней опорной плиты ($Re = 79000$)

5. В выходном участке ТВС кассетного типа с модернизированной головкой аксиальный расход потока теплоносителя распределился следующим образом:

- через шесть сливных отверстий головки аксиальный расход потока теплоносителя распределился равномерно. Через каждое из сливных отверстий протекает в среднем $4,0\% \div 4,5\%$ от аксиального расхода потока на входе в модель;
- через втулку центрального вытеснителя величина аксиального расхода теплоносителя составила $4,5\%$ от аксиального расхода потока на входе в модель;
- в конфузоре головки ТВС аксиальный расход потока распределяется равномерно. Через каждое из шести сливных окон головки вытекает $11\% \div 12,0\%$ от аксиального расхода потока на входе в модель.
- через сливные отверстия величина аксиального расхода теплоносителя составила $18,5\% \div 20,5\%$ от аксиального расхода потока на входе в модель;
- через трубу отбора теплоносителя аксиальный расход потока теплоносителя составил $2,7\%$ от аксиального расхода потока на входе в модель.

Анализ результатов экспериментальных исследований перемешивания теплоносителя методом инъекции контрастной примеси позволил детализировать картину течения теплоносителя в выходном участке топливной кассеты с модернизированной головкой и сделать следующие выводы:

1. В независимости от расположения зоны подачи в пучке твэлов перемешивание теплоносителя на выходе из него имеет низкую интенсивность. Происходит незначительное рассеяние примеси из ячейки подачи, ограниченное двумя рядами твэлов, а также смещение области с максимальной концентрацией к центральной части сборки в область конфузора головки (рис. 9). Значения концентрации примеси составляют $(1900 \div 2400)$ ppm.

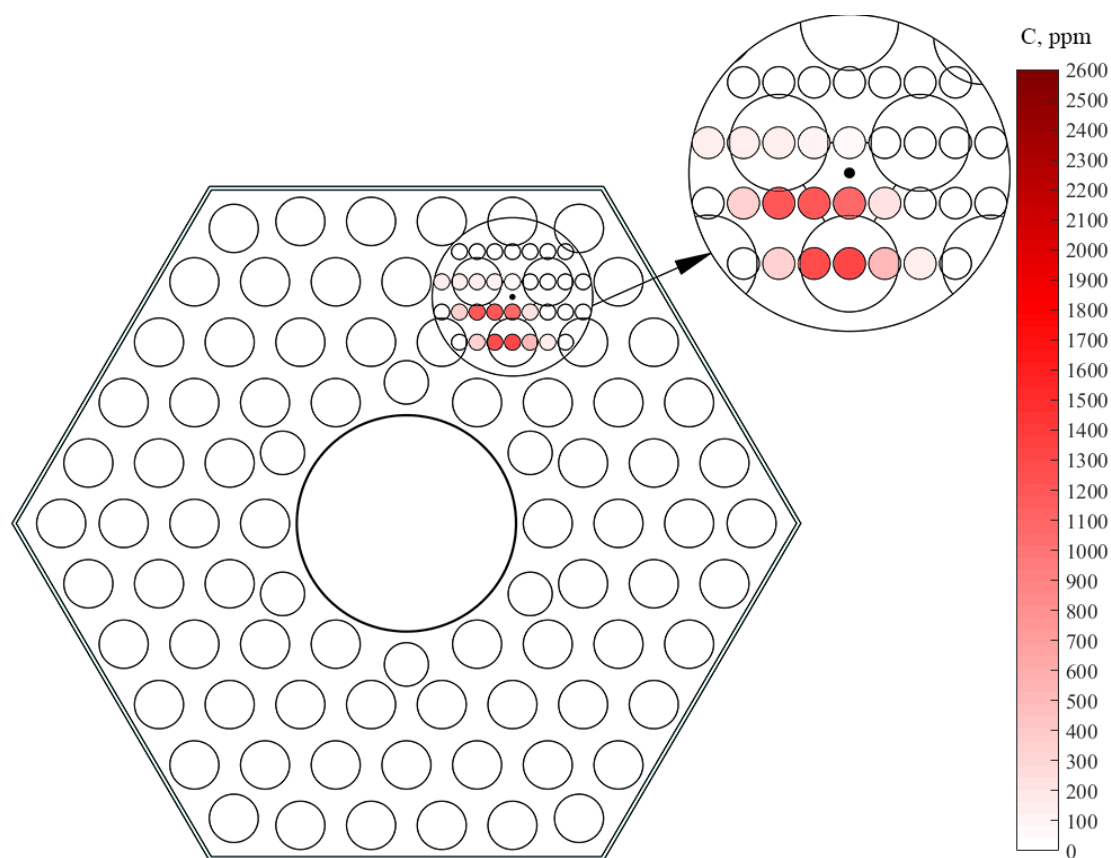


Рис. 9. Область растекания контрастной примеси в твэльном пучке при ее подаче в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя ($Re = 79000$)

2. В сечении на выходе из сливных окон и отверстий модернизированной головки вне зависимости от зоны подачи примесь попадает в ближайшее к ячейке подачи сливное окно и сливное отверстие. Значения максимальных концентраций примеси находятся в диапазоне (350÷500) ppm (рис. 10). Такое распределение примеси в сливных окнах и отверстиях модернизированной головки свидетельствует о низкой интенсивности перемешивания теплоносителя в области между выходом из твэльного пучка и входом головки.

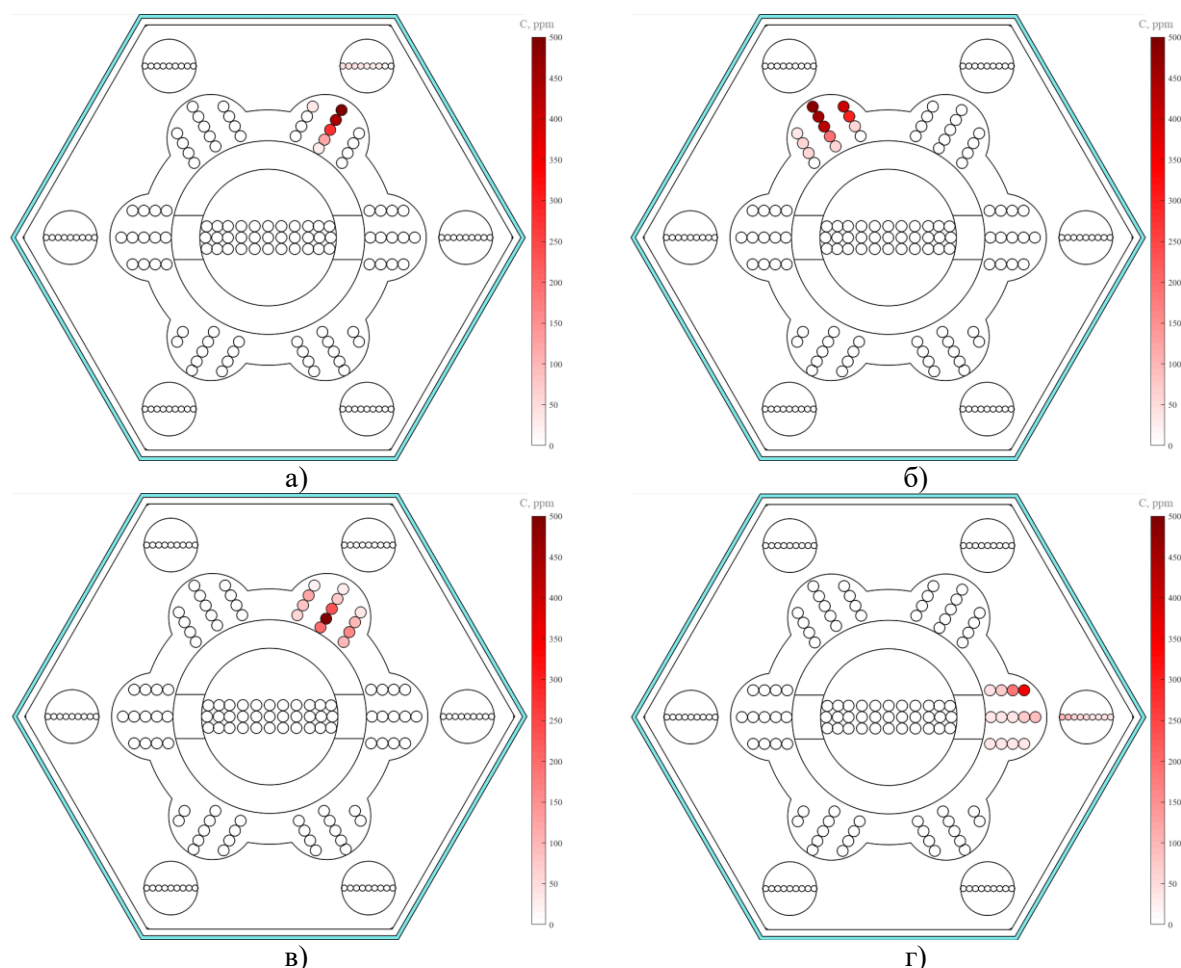


Рис. 10. Области растекания контрастной примеси на выходе из модернизированной головки: а) впрыск контрастной примеси в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя; б) впрыск контрастной примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя; в) впрыск контрастной примеси в ячейку около трубы центрального вытеснителя; г) впрыск контрастной примеси в угловую ячейку ($Re = 79000$)

3. При подаче контрастной примеси в регулярную ячейку, близкую к трубе отбора теплоносителя и ячейку, расположенную возле трубы центрального вытеснителя, примесь попала в имитатор трубы отбора. Об этом говорит локализация наибольших величин ее концентрации непосредственно в области расположения входного сечения трубы отбора. Концентрации примеси в области локального максимума составили (190÷250) ppm. При подаче контрастной примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя, и угловую ячейку, примесь не попала в имитатор трубы отбора теплоносителя. Области локальных максимумов концентрации примеси расположены вдали от входного сечения трубы отбора теплоносителя и составили (130÷170) ppm.

4. В сегментах сливных отверстий опорной плиты, примесь распространяется равномерно, не завися от расположения ячейки подачи в пучке твэлов. Наибольшая концентрация примеси, лежащая в диапазоне (55÷100) ppm, наблюдается при ее подаче в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя и в угловую ячейку. Минимальная концентрация примеси, лежащая в диапазоне (10÷60) ppm, соответствует ячейке подачи у центрально вытеснителя и регулярной ячейке, близкой к трубе отбора, это объясняется тем, что значительная часть примеси попала в трубу отбора теплоносителя. Распределение контрастной примеси в окнах верхней опорной плиты свидетельствует о наличии преимущественно аксиального течения потока, обусловленного геометрией сливных отверстий и окон модернизированной головки, что в свою очередь говорит о низкой интенсивности перемешивания теплоносителя в области между выходом из модернизированной головки ТВС и входом в верхнюю опорную плиту.

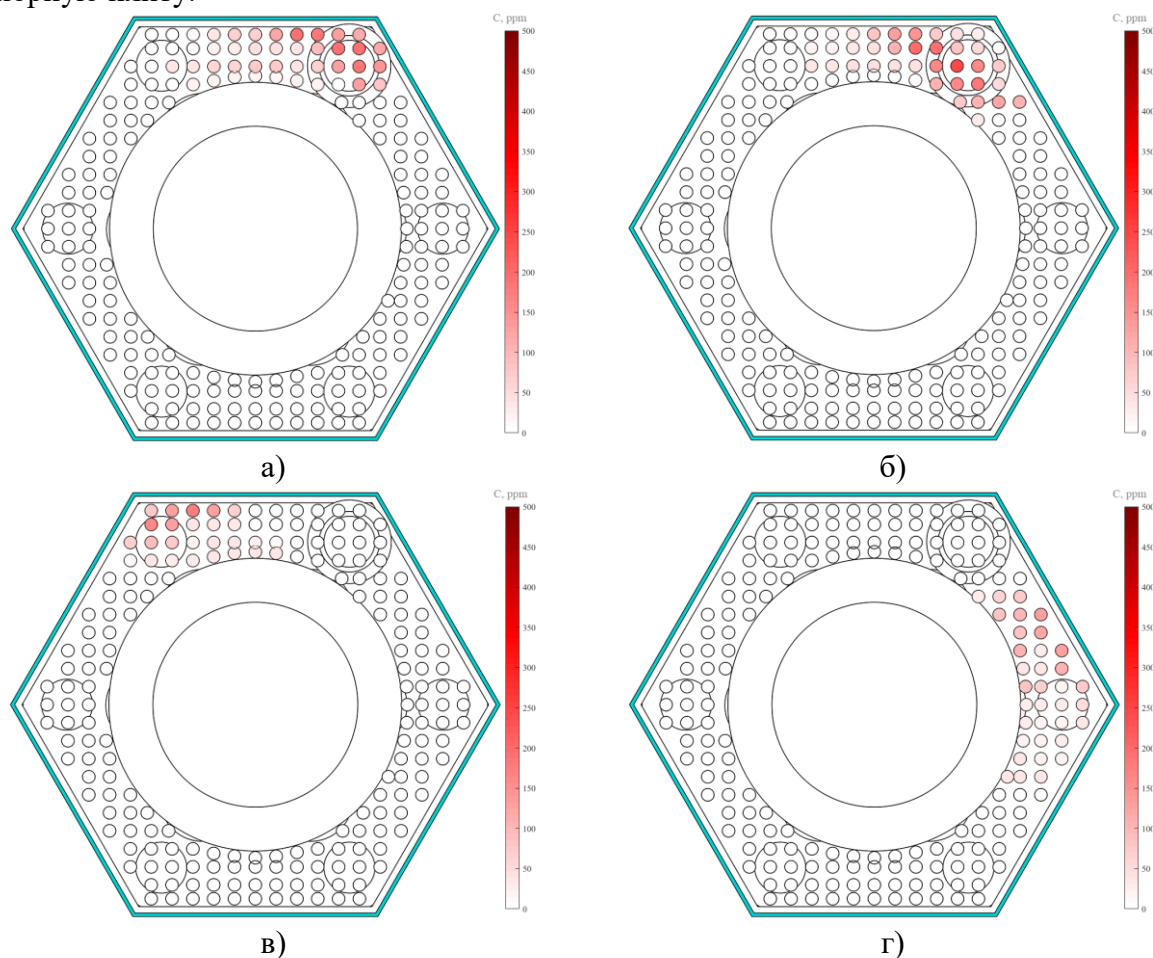


Рис. 11. Области растекания примеси перед трубой отбора теплоносителя: а) впрыск примеси в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя; б) впрыск примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя; в) впрыск примеси в ячейку около трубы центрального вытеснителя; г) впрыск примеси в угловую ячейку ($Re = 79000$)

Заключение

Выявлены особенности течения теплоносителя в выходном участке ТВС с модернизированной головкой. Выявлено влияние конструкции модернизированной головки ТВС на движение потока. Симметричное расположение сливных окон и отверстий головки позволяет получить однородное поле аксиальной скорости

и аксиального расхода потока внутри головки. Локализованы в поперечном сечении выходного участка ТВС зоны с низкими осевыми скоростями потока, лежащими в диапазоне $(0,1 \div 0,4)$, расположенные у поверхностей труб центрального вытеснителя и отбора теплоносителя, а также чехла ТВС. Влияние трубы отбора теплоносителя сохраняется по всей длине выходной части головки ТВС, выявлено перераспределение потока из области трубы отбора в соседние с ней зоны, что обусловило неоднородность поля аксиальных скоростей в сливных окнах верхней опорной плиты, а также привело к образованию зон низкой аксиальной скорости потока. Попадание доли расхода потока теплоносителя в трубу отбора происходит преимущественно из областей твэльного пучка, расположенных напротив трубы отбора. Таким образом, в области между выходом из головки ТВС и верхней опорной плитой процесс перемешивания теплоносителя имеет низкую интенсивность, происходит преимущественно аксиальное движение потока.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Список использованной литературы

1. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д.Л. Зверев [и др.] // Атомная энергия. – 2020. –Т. 129. Вып. 1. – С. 29–37.
2. Активные зоны действующих атомных ледоколов / Д.Л. Зверев [и др.] // судостроение. – 2020. –№1. – С. 13–16.
3. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития / В.М. Беляев [и др.] // Атомная энергия. – 2020. –Т. 129. Вып. 1. – С. 37–43.
4. Реакторные установки для атомных станций малой мощности / В.В. Петрунин // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91. Вып. 6. – С. 528–540.
5. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. –Т. 120. Вып. 5. – С. 270–275.
6. Расчетно-экспериментальные исследования течения потока теплоносителя в кассетной активной зоне реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2017. –Т. 90. Вып. 4. – С988–996.
7. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. –№8. – С41–48.
8. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа. 1973.